

**О.Шаблій , докт. фіз.-мат. наук; Ч.Пулька, докт. техн. наук**

*Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя*

## **МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ІНДУКЦІЙНОГО НАПЛАВЛЕННЯ ТОНКИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ**

*Розроблено методики для вимірювання температурного поля в зоні наплавлення, дослідження стійкості проти спрацювання, товщини шару наплавлюваного металу, а також прогинів тонких дисків, які дозволяють зменшити трудові і матеріальні затрати та оцінити якісні показники при розробці нових технологічних процесів індукційного наплавлення тонких елементів конструкцій в залежності від типу нагрівальних систем та режимів нагрівання.*

**O.Shabliy, Ch.Pulka**

## **DEVELOPMENT OF METHODS FOR EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE MANUFACTURING PROCESSES OF THE INDUCTION WELDING OF THIN CONSTRUCTION ELEMENTS**

*The methods for measuring temperature field in the welding area are developed. Wear resistance of the welded metal layer thickness as well as thin dishes deflection which allow to decrease labour and cost expenditures, are investigated. Estimation data for the development of new technological processes of the induction welding of thin elements of the construction depending on the type of the heating systems and regimes are analyzed.*

### **1. Методика дослідження температурних полів при індукційному напавленні тонких дисків**

При розробці нових технологічних процесів індукційного наплавлення тонких елементів конструкцій, в тому числі тонких дисків, важливе місце займає проектування і конструювання нагрівальних джерел (індукторів і систем), за допомогою яких досягається необхідний розподіл температури в зоні наплавлення, яка впливає на рівномірність товщини шару наплавлюваного металу. При експериментальному дослідженні температурного поля, яке створюється в зоні наплавлення за допомогою двохвиткового кільцевого індуктора, виникають певні труднощі. Одна з них полягає в тому, що при виборі розташування кільцевих витків індуктора відносно наплавлюваної поверхні, при відлагодженні технологічного процесу, необхідно неодноразово заміряти температуру в зоні наплавлення, тому що наплавлюваний порошковий матеріал (твердий сплав) розплавляється від поверхні основного металу, що відображається на нерівномірності товщини шару наплавлюваного металу.

Існуючі методи контактного вимірювання температури в зоні наплавлення дуже трудомісткі. Крім того, багаторазове з'єднання спаїв термопар з основним металом призводить до додаткових похибок [1]. Друга проблема полягає в тому, що при ширині зони наплавлення, яка може змінюватись в межах 10...50 мм, необхідно розташовувати в один ряд декілька термопар на малій відстані одна від одної з однаковим кроком, що забезпечити відомими пристосуваннями і способами закріплення термопар до поверхні деталі дуже складно [2-5].

І нарешті, при індукційному нагріванні тонких плоских деталей товщиною 2...6 мм виникають деформації поверхонь, що також необхідно враховувати при вимірюванні температури.

З метою усунення вищеперелічених недоліків необхідно було розробити методику дослідження температурного поля по ширині зони наплавлення тонких дисків для узгодження конструктивних розмірів індукторів і нагрівальних систем, отриманих

теоретичним шляхом, і порівняти їх з експериментальними результатами при розробці нових технологічних процесів індукційного наплавлення тонких сталевих дисків.

Експериментальні дослідження температурного поля в зоні наплавлення проводилися за методикою [6] з деякими конструктивними опрацюваннями пристосування для розташування термопар на поверхні диска, яка підлягає наплавленню. Для цього була розроблена схема (рис. 1), яка складається з досліджуваного об'єкту 1, чотирьох термопар 2, коробки 3 для з'єднання вихідних кінців термопар, акумулятора 4, конденсатора 5, тензопідсилювача 6 з приладами живлення 7, а також швидкодіючого самопишучого приладу 8 і двохвиткового кільцевого індуктора 9. В якості термопар використовували хромель-алюмелеві (ХА) термоелектроди діаметром  $d = 0,3$  мм, вихідні кінці яких виведені в коробку 3. З метою усунення впливу можливих наведень високочастотного поля на запис температури, одну з обмоток конденсатора 5 заземляли. Крім схеми, був розроблений також пристрій для вимірювання температури по ширині зони наплавлення (рис.2).

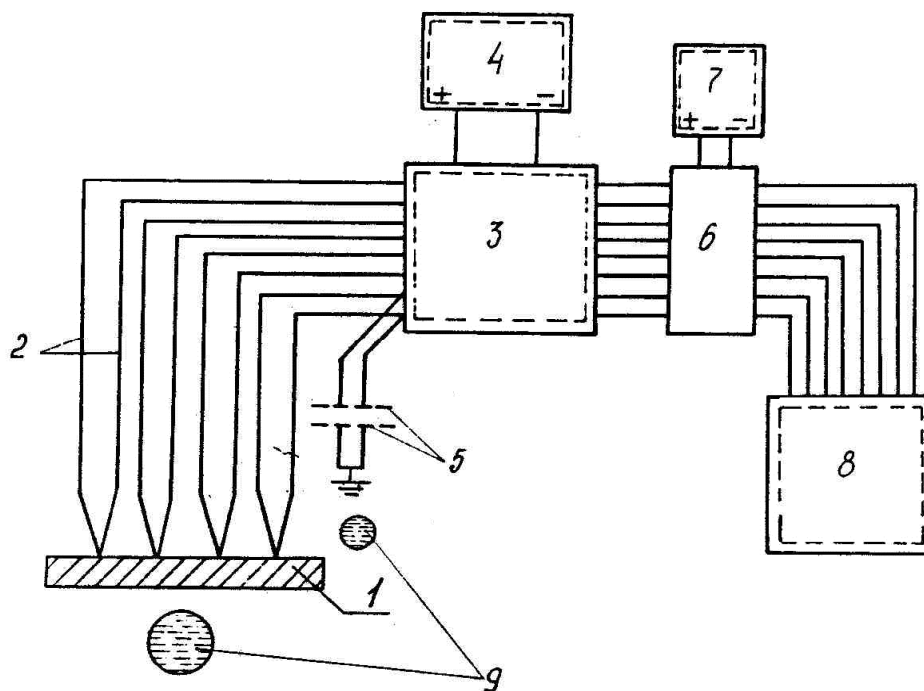


Рисунок 1- Схема для вимірювання температури в зоні наплавлення (позначення див. в тексті)

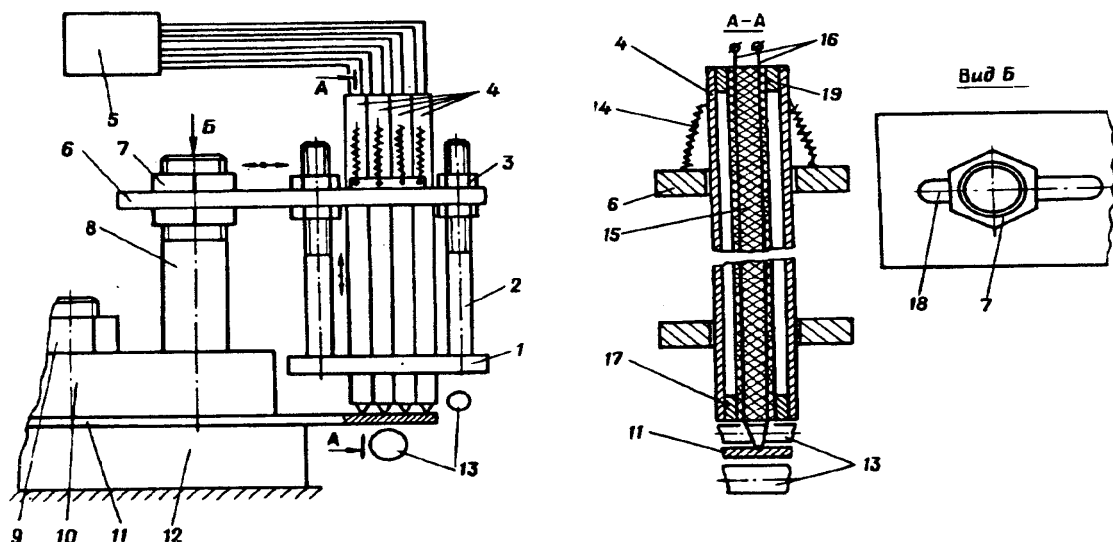


Рисунок 2 - Пристрій для вимірювання температури (позначення див. в тексті)

Він складається з нижньої 1 і верхньої 6 пластин, які жорстко з'єднані між собою за допомогою двох шпильок 2 і гайок 3. Нижні кінці шпильок жорстко закріплені до пластини 1, а верхні кінці встановлені вільно в двох отворах пластини 6.

Відстань між пластинами 1 і 6 регулюється за допомогою згаданих вище гайок, в залежності від довжини термодатчиків. У верхній і нижній частинах пластин виконані поздовжньо-радіальні пази, в яких розташовані вертикально-рухомі мідні трубки 4; у внутрішній частині яких розташовані керамічні буси 15, всередині яких встановлені дрони термопар 16. Керамічні буси з термопарами закріплені в трубках 4 жорстко з допомогою керамічних втулок 17 і 19. Вертикальне переміщення мідних трубок 4 і притискання термопар до поверхні, що нагрівається, виконується зусиллям пружин 14, нижній кінець яких закріплений до верхньої пластини 6, а верхній – до трубок 4 (рис.2).

Для вертикального, горизонтального і кругового переміщення пристрою відносно поверхні, яка досліджується, у верхній пластині виконано додатковий поздовжньо-радіальний паз 18. Фіксація пристосування в заданому положенні виконується за допомогою стійки 8, у верхній частині якої є різьба для гайок 7. Стійка розташована на верхній монтажній плиті 10, з допомогою якої здійснюється притискання диска 11 до нижньої плити 12 за допомогою болта 10 з гайкою 9.

Для запису температури одночасно в чотирьох точках в якості швидкодіючого самопишучого приладу використовували чотирьохканальний прилад НЗ38-4П (рис. 3).

З метою підсилення електрорушійної сили термопар використовували тензопідсилювач типу “Топаз-4-01” з регулюючим приладом живлення “Агат-7” (рис.4). При градуюванні термопар проводилось записування їх ЕРС на приладі НЗ38-4П при різних температурах. Цей запис співставлявся із записом ЕРС контрольної термопари.

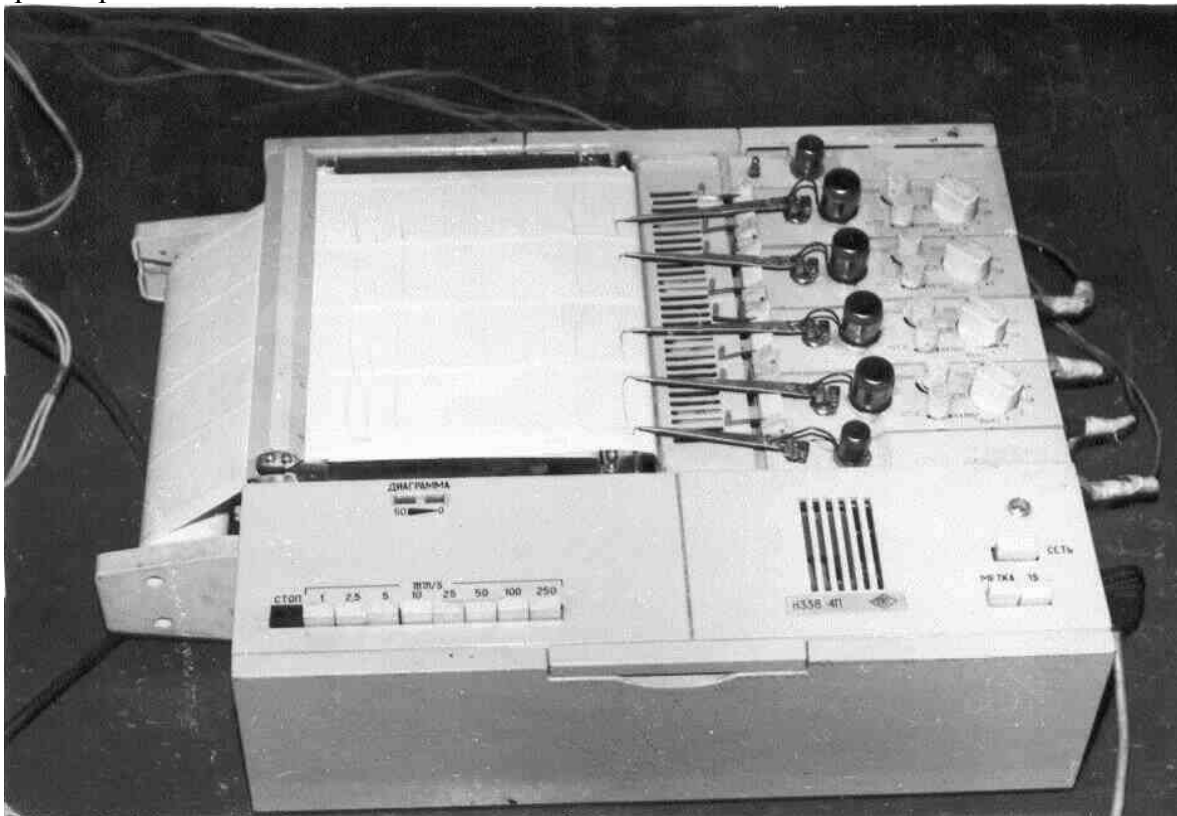


Рисунок 3 - Самопишучий прилад НЗ38-4П

Точність контролю температури за допомогою термопар складала  $\pm 1\%$ . При вимірюванні температури в області, характерній для наплавлення ( $\sim 1220^\circ\text{C}$ ), похибка складала  $\pm 12^\circ\text{C}$ . Необхідно відзначити, що мідні трубки разом з термопарами розташовуються у вертикальних пазах пластин з можливістю вертикального їх переміщення одна відносно одної. Це пов'язано з тим, що при нагріванні тонких

плоских деталей з допомогою індуктора створюється температурне поле, яке викликає деформації наплавлюваної частини деталі. За рахунок вертикального переміщення термопар підтримується постійний контакт між поверхнею деталі і спаями термопар. Мідні трубки 4 служать для усунення впливу можливих наведень височастотного поля. Крім того, використовували конденсатори, одну із обкладок яких заземляли.

Методика відпрацьовувалась на прикладі індукційного наплавлення ножів гичкорізів, що представляють собою тонкий диск із зубами, виготовлений зі сталі Ст3 товщиною 3 мм.

Наплавлення ножів-гичкорізів проводилось одночасно по всій робочій поверхні з допомогою двохвиткового кільцевого індуктора (рис.2), один виток якого розташований під поверхнею, що наплавлюється (діаметр витка якого менший за діаметр диска), а другий – над верхньою поверхнею диска, діаметр витка якого більший за діаметр диска (рис. 2).

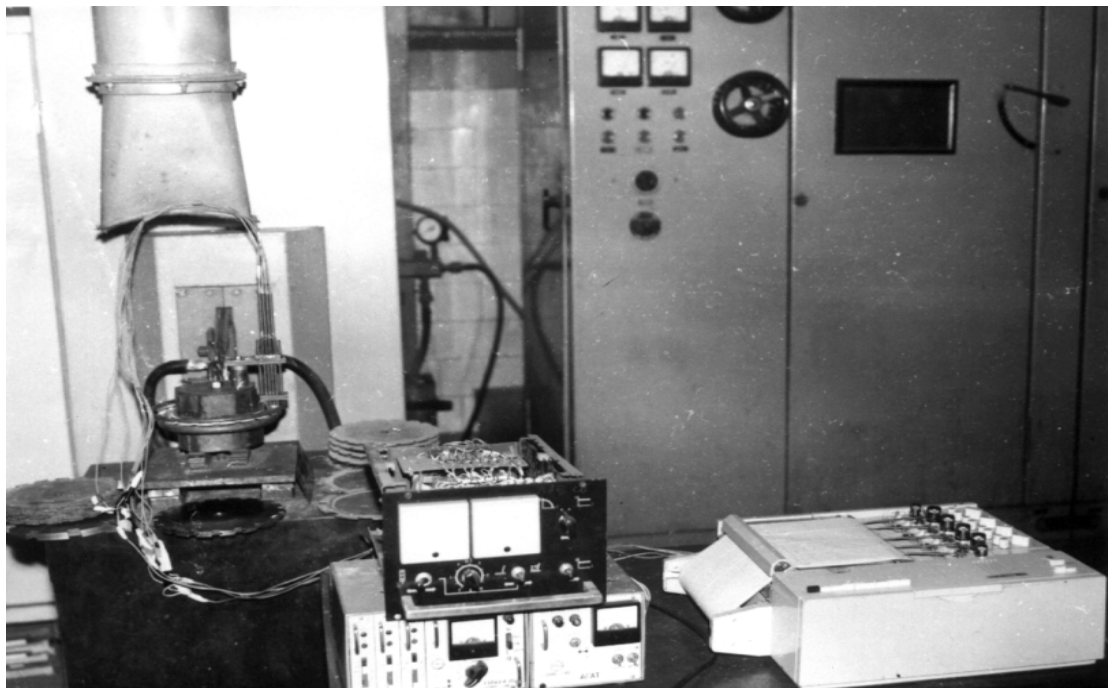


Рисунок 4 – Установка для експериментального дослідження температурного поля в зоні наплавлення

Вимірювання температури в зоні наплавлення здійснювалось наступним чином. Спочатку встановлювали наплавлюваний диск 11 в притискні плити 10, 12, а потім розташовували його в двохвитковому кільцевому індукторі (рис. 2). Зверху на притискній плиті закріплювали пристосування з термопарами, після чого вмикали генератор СВЧ і одночасно самопишучий прилад НЗ38-4П, який записував зміну температури за відповідний проміжок часу одночасно в чотирьох точках.

На рис. 4 показано загальний вигляд установки для дослідження температурного поля по ширині зони наплавлення тонких сталевих дисків з вищеописаним обладнанням, включаючи також височастотний генератор.

На рис. 5, б показано експериментально побудований графік зміни температури в часі (суцільна крива 3), коли в зоні наплавлення прикладена постійна питома потужність  $W = 0,37 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>3</sup> (крива 1, рис. 5, а) протягом 32 с. На графіку приведено також залежність зміни температури від часу, яка знайдена теоретично (штрихова крива 4, рис 5, б) для цього випадку. Їх добре співпадання дає підставу говорити про можливість використання теоретично знайдених з такою ж точністю результатів і при інших режимах нагрівання, наприклад, енергоощадному (крива 2, рис. 5, а), температура для якого наведена на рис. 5, б штрихпунктиром (крива 5).

Теоретичні результати остигання диска також добре узгоджуються з експериментальними (рис. 5, б, крива 3).

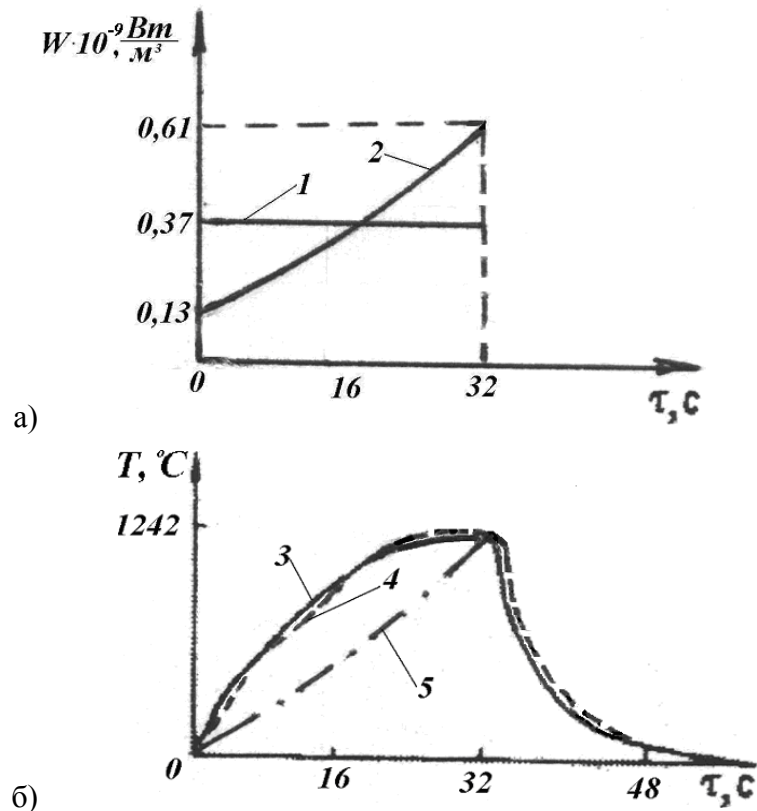


Рисунок 5 – Графіки зміни питомої потужності теплових джерел і температури в зоні наплавлення: а – при постійній і енергоощадній питомих потужностях, отриманих теоретичним шляхом (1, 2); б – відповідно температура, 4, 5; 3 – експериментальна крива для  $\tau = 32$  с при напавленні і остиганні диска

## 2. Методика дослідження товщини шару наплавлюваного металу і прогинів тонких дисків

Важливим критерієм, який характеризує якість наплавлення, є товщина шару наплавлюваного металу по всій робочій поверхні, яка, згідно з кресленням, повинна знаходитися в межах  $1_{-0,2}^{+0,5}$  мм.

Для оцінки технологічного процесу індукційного наплавлення тонких дисків для двох способів наплавлення – неперервно-послідовного і одночасного, – була розроблена методика дослідження товщини наплавлюваного металу.

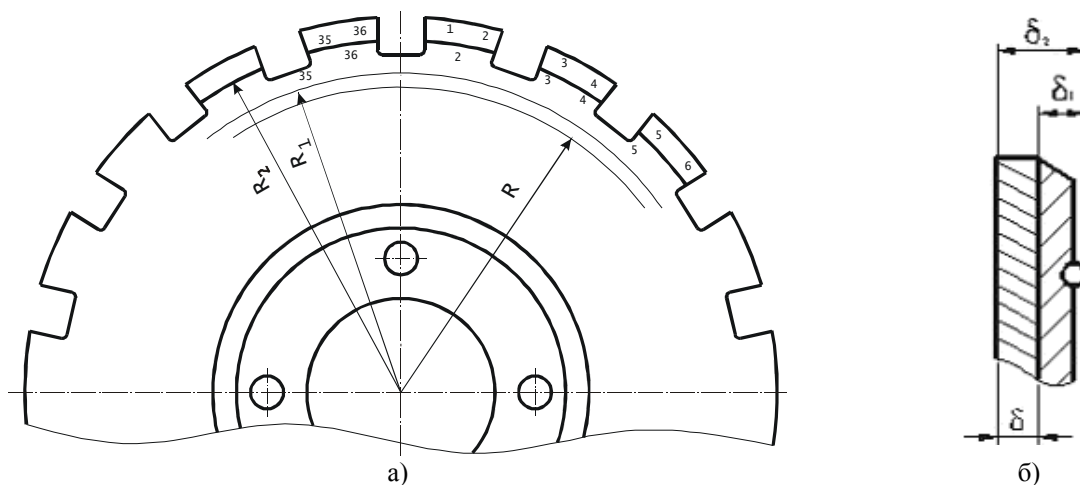


Рисунок 6 – а – ніж-гичкоріз, підготовлений для вимірювання товщини шару наплавлюваного металу і прогинів; б – переріз в зоні наплавлення

На диску за допомогою спеціального інструмента з кулькою на торці виконували напівсферичні виямки в 36 точках по радіусу  $R_2=202,5$ мм, як показано на рисунку 6 а), зі сторони, протилежної поверхні диска, що підлягає напавленню (рис. 6 б).

Потім за допомогою мікрометра, а також другої кульки аналогічного діаметру, що служить опорою для губок мікрометра (одна губка якого напівсферична, а інша з плоскою поверхнею), заміряли товщину  $\delta_1$  основного металу до напавлення (рис. 6 б).

Кульки необхідні для підвищення точності вимірювання товщини шару напавлюваного металу в кожній з 36 точок, оскільки при індукційному напавленні тонких дисків на поверхні, протилежній напавлюваній, утворюється окалина, при вимірюванні мікрометром товщини шару напавленого металу без кулек можуть виникнути великі похибки.

Товщина  $\delta$  напавлюваного шару визначалась як різниця товщин напавленого диску  $\delta_2$  і основного металу  $\delta_1$ .

Обробку результатів вимірювання товщини шару напавлюваного металу проводили за допомогою методів математичної статистики [7].

Криві розсіювання фактичних розмірів і криві нормального розподілу товщин напавлюваного шару при неперервно-послідовному і одночасному напавленні наведені на рис. 7.

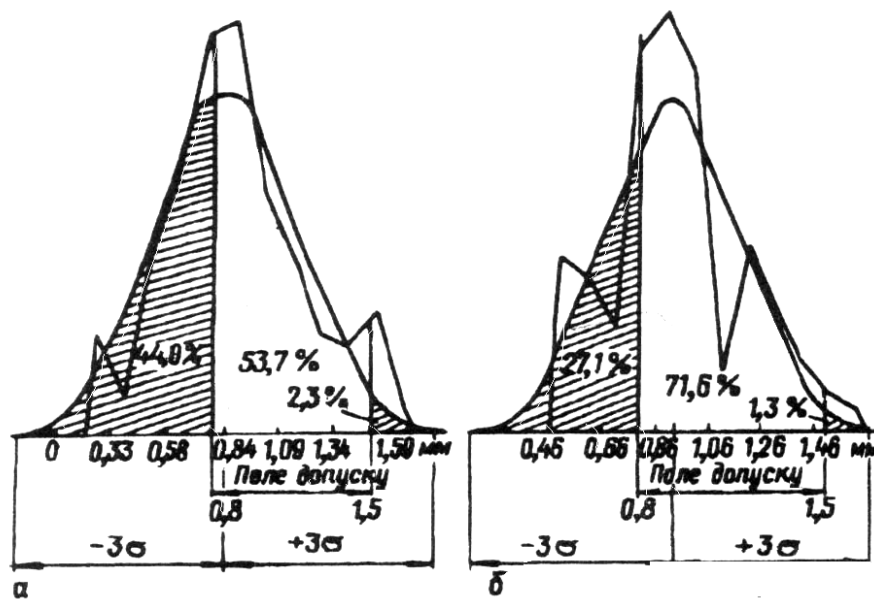


Рисунок 7 – Криві нормального розподілу товщини шару напавлюваного металу: а – неперервно-послідовне напавлення по радіусу R; б – одночасне напавлення

Незаштриховані області, які знаходяться під кривою нормального розподілу, теоретично представляють собою відсоткову долю деталей, в яких товщина шару напавлюваного металу знаходиться в полі допуску.

При одночасному напавленні в поле допуску потрапляють 71,6% вимірів товщин шару напавлюваного металу, що на 18% більше, ніж при неперервно-послідовному варіанті (див. рис. 7, а і б). Більш рівномірна товщина шару напавлюваного металу, а також зменшення прогинів напавлених деталей в цьому випадку досягається за рахунок використання двохвиткового кільцевого індуктора і енергоощадного режиму нагрівання, що забезпечує швидке і рівномірне розплавлення шихти з утворенням єдиної рідкої ванни по всій робочій поверхні напавлення.

При неперервно-послідовному напавленні в поле допуску ( $\delta=0,8\ldots1,5\text{мм}$ ) потрапляють тільки 53,7% вимірів товщин шару напавлюваного металу. У цьому випадку деталь деформується під час нагрівання в більшій мірі, ніж при одночасному напавленні, і розплавлена шихта нерівномірно розподіляється на поверхні.

Для дослідження прогинів ножів (відхилення робочої поверхні А відносно базової площини Б) була розроблена спеціальна установка (рис. 8).

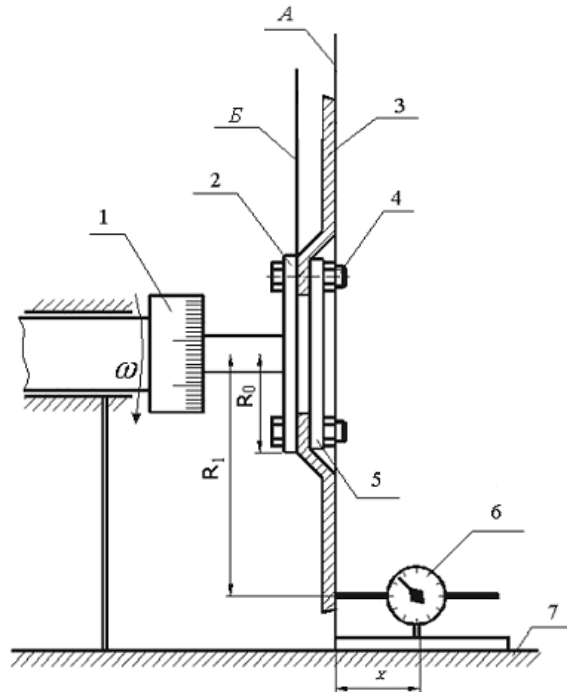


Рисунок 8 – Схема установки для вимірювання прогинів диска

Установка складається з універсальної ділильної головки 1, закріпленої на столі токарно-гвинторізного верстату 7. В шпинделі головки встановлюється оправка 2, до якої за допомогою болтів 4 і фланця 5 притискається досліджуваний ніж 3. Вимірювання прогинів проводили за допомогою індикатора годинникового типу 6, встановленого жорстко на станині верстата 7. Прогини заміряли на поверхні з середнім радіусом  $R_1=192\text{мм}$  в 36 точках (рис. 6 а). При вимірюванні прогинів враховувалося биття поверхні оправки 2, до якої прилягає базова поверхня ножа.

Прогини диска з урахуванням биття оправки розраховували за формулою  $\Delta = \Delta_0 \frac{R_1}{R_0}$ , де  $\Delta_0$  - биття оправки.

Потім будували графік  $\Delta = f(\varphi)$  (рис. 9), де  $\varphi$  - розгорнутий кут нахилу площини А відносно базової площини Б (в градусах) з масштабом 5 мм -  $10^\circ$ ; 10 мм –  $20^\circ$  і т.д.

При вимірюванні прогинів кожного диска координату  $x$  установки індикатора відносно робочої поверхні А (рис. 8) змінювали так, щоб стрілка індикатора 6 опинялась на нульовій відмітці.

Диски після штампування мали односторонні прогини в процесі наплавлення, характер прогинів не змінювався, змінювалась тільки їх величина.

Результати вимірювань прогинів дисків до і після наплавлення для двох технологічних варіантів наведені на рис. 9. Прогини дисків, наплавлених за новою технологією, знаходяться на рівні їх прогинів після рихтування відразу за неперервно-послідовним наплавленням, що дозволяє в даному випадку виключити операцію рихтування.

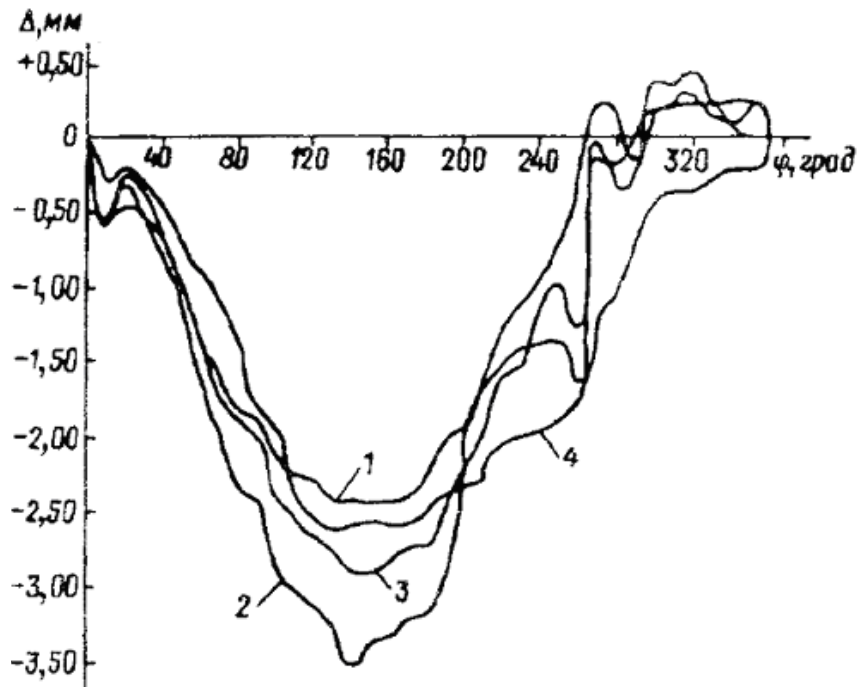


Рисунок 9 – Прогини диска: 1 – до наплавлення; 2 – після неперервно-послідовного наплавлення; 3 – після рихтування; 4 – після одночасного наплавлення

### 3. Дослідження стійкості проти спрацювання напавленого металу

Для дослідження стійкості проти спрацювання різних матеріалів існує багато установок і методик, які описані в роботах [8-10]. При дослідженні напавленого металу на стійкість проти спрацювання використано установку НК-М, яка описана в роботі [11] і показана на рис. 10.

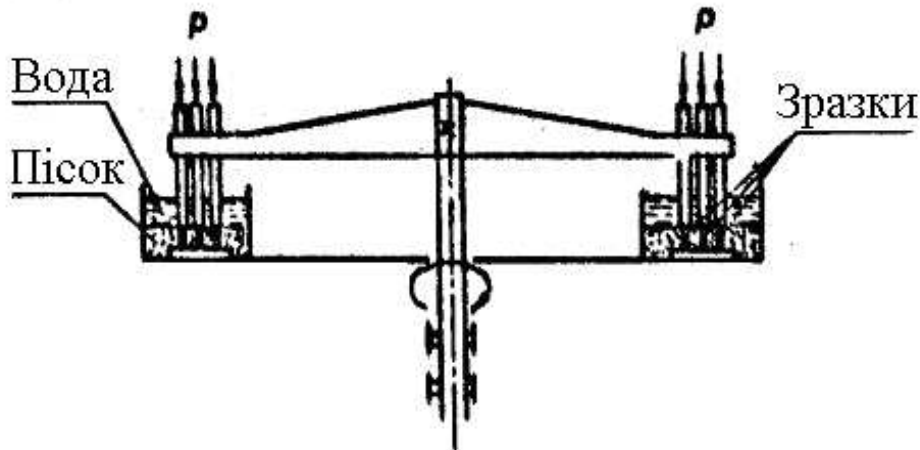


Рисунок 10 – Схема машини НК-М

Вона призначена для дослідження стійкості проти спрацювання напавленого металу по абразивному прошарку. Створена установка в Інституті електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України на базі машини НК – конструкції Інституту машинознавства. Замість однієї є три доріжки тертя (у вигляді кілець з міді). В ній одночасно досліджується в рівних умовах з незалежним навантаженням шість зразків, один з яких є еталоном. Зразки розміру 16x16x6 мм, тертя по площині 16x6 мм. Умови досліджень: абразив – кварцевий пісок; розміри частинок – 0,2...0,4 мм; шлях тертя – 413 м; питомий тиск – 0,466 МПа; еталон – відпалена сталь 45.

Оскільки заготовка (основний метал) є тонким диском товщиною  $\delta=3$  мм і з напавленим шаром товщиною 0,8...1,5 мм, виникла необхідність у виготовленні спеціальних зразків для проведення досліджень стійкості проти спрацювання з використанням машини НК-М. Спочатку вирізали на фрезерному верстаті заготовку із



сталі Ст3 (прямокутник з розмірами 16x11,8x6 мм) з допуском на наступне шліфування, як показано на рис. 11, а. В нижній його торцевій частині фрезерували прямокутний паз. Пізніше в цей паз запресовували з боку основного металу Т-подібну заготовку (рис. 11, б) разом з наплавленим шаром на основний метал, як показано на рис. 11, в. Потім шліфували зразок до розмірів 16x16x6 мм. Дослідження стійкості проти спрацювання проводили ваговим методом.

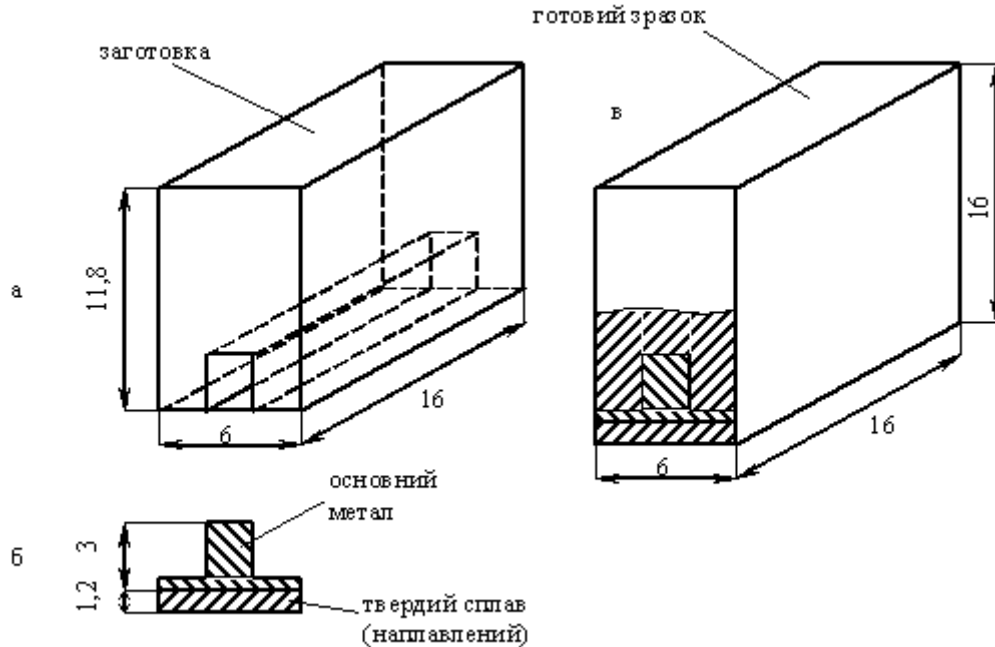


Рисунок 11 – Зразок для дослідження стійкості проти спрацювання: а – прямокутна заготовка; б – Т-подібна вставка з основним і наплавлюваним металом; в – готовий зразок для дослідження на машині НК-М

### Висновки

1. Розроблено методики для вимірювання температури по ширині зони наплавлення тонких дисків та дослідження стійкості проти спрацювання наплавленого металу, які дозволяють зменшити матеріальні та трудові затрати, які пов'язані з проведенням експерименту, заміною заготовок, конструкціями індукторів і нагрівальних систем, виходячи з потреб технології, та порівнювати теоретичні результати з експериментальними.
2. Розроблена методика дослідження товщини шару наплавлюваного металу та установка для вимірювання прогинів тонких дисків при наплавленні дозволяють оцінити якісний показник технологічного процесу індукційного наплавлення тонких сталевих дисків в залежності від режимів наплавлення, конструкції індукторів та нагрівальних систем.

### Література

1. Теплотехнический справочник. Том 2 / Под ред. В.Н.Юренева и П.Д. Лебедева. – М.: Энергия, 1976. – 696с.
2. А. с. 467997 СССР, М.Кл. Е21в 47/06. Дифференциальный датчик температуры для термомассометрической аспирационной установки / Н.А.Скибickaя, Я.Р.Морозович. – № 1426158/72-3; заявлено 24.04.70. – Оpubл. 25.04.75. – Бюл. № 15. – С. 2.
3. А. с. 197221 СССР, М.Кл. 421, 7/01. Устройство для крепления датчика температуры на измеряемой поверхности / А.В.Абросимов, М.Д.Нота-риус, И.Л.Ротберг и др. № 929256/26-10; заявлено 18.11.1964. – Оpubл. 31.06.67. Бюл. № 12. – С. 2.
4. А. с. 798508 СССР, М.Кл.<sup>3</sup> СОІК 7/02. Устройство для измерения температуры / И.Т. Исарович. – № 17996388/18-10; заявлено 14.02.74. – Оpubл. 23.01.81. – Бюл. № 3. – С. 2.
5. Исследование температурного поля при индукционной наплавке тонких фасонных дисков / О.Н.Шаблий, Ч.В.Пулька, В.П.Будзан, Б.П. Татаринев // Повышение качества и надежности машиностроительной продукции. Тез.докл.обл.конф. – Луцк, 1989. – С. 21-22.

6. Рябцев И.А. Классификация и характеристика способов наплавки // Сварщик. - 1998. - № 3. - С.23-25.
7. Колкер Я.Д. Математический анализ точности механической обработки деталей. – Киев: Техніка, 1976. – 200 с.
8. Теоретические и технологические основы наплавки. Свойства и испытания наплавленного металла / Под редакцией И.И.Фрумина. – Киев: ИЭС им. Е.О.Патона. – 1979. – 170 с.
9. Корж В.Н., Калашников А.В. Расчетно-экспериментальный метод оценки износостойкости газотермических покрытий на основе карбида бора // Праці Міжнародної конференції „Прогресивна техніка і технологія машинобудування, приладобудування і зварювального виробництва”. – Том IV, Київ, НТУУ „КПІ”, 1998. – С. 319-322.
10. Рябцев И.А. Износостойкость наплавленного металла системы легирования Fe-C-Cr-Ti-Mo // Автомат. сварка. – 2002. – № 4. – С. 48-51.
11. Юзвенко Ю.А., Гавриш В.А., Марьенко В.А. Лабораторные установки для оценки износостойкости наплавленного металла // Теоретические и технологические основы наплавки. Свойства и испытания наплавленного металла. – Киев: ИЭС им. Е.О.Патона. – 1979. – С. 23-27.

*Одержано 25.10. 2007 р.*